

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

11.12.03

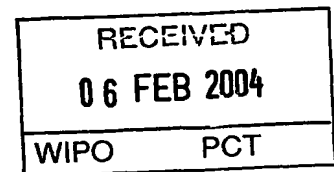
10 JUN 2005

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日  
Date of Application: 2003年12月 9日

出 願 番 号  
Application Number: 特願2003-410966  
[ST. 10/C]: [JP2003-410966]



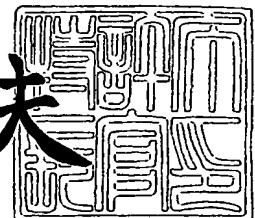
出 願 人  
Applicant(s): 独立行政法人 科学技術振興機構

PRIORITY DOCUMENT  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年 1月23日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願  
【整理番号】 P2392JST  
【提出日】 平成15年12月 9日  
【あて先】 特許庁長官 殿  
【国際特許分類】 H01L 43/00  
H01L 43/10

【発明者】  
【住所又は居所】 宮城県仙台市青葉区栗生 1-7-12  
【氏名】 猪俣 浩一郎

【発明者】  
【住所又は居所】 宮城県仙台市太白区長町 8-2-31-205  
【氏名】 手束 展規

【特許出願人】  
【識別番号】 503360115  
【氏名又は名称】 独立行政法人科学技術振興機構

【代理人】  
【識別番号】 100082876  
【弁理士】  
【氏名又は名称】 平山 一幸  
【電話番号】 03-3352-1808

【選任した代理人】  
【識別番号】 100069958  
【弁理士】  
【氏名又は名称】 海津 保三

【先の出願に基づく優先権主張】  
【出願番号】 特願2002-363127  
【出願日】 平成14年12月13日

【手数料の表示】  
【予納台帳番号】 031727  
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】  
【物件名】 特許請求の範囲 1  
【物件名】 明細書 1  
【物件名】 図面 1  
【物件名】 要約書 1  
【包括委任状番号】 0316160

**【書類名】 特許請求の範囲****【請求項 1】**

スピン偏極部と注入接合部とを有するスピン注入部と、  
非磁性層を介して磁氣的に反平行に結合した磁化の大きさが異なる第 1 の磁性層及び第 2 の磁性層を有する S y A F と、を備え、  
上記 S y A F と上記注入接合部とが接合しており、  
上記スピン注入部からスピン偏極電子を注入し上記第 1 の磁性層及び上記第 2 の磁性層の磁化が反平行状態を維持したまま磁化反転する、スピン注入デバイス。

**【請求項 2】**

前記スピン注入部の注入接合部が、非磁性導電層及び非磁性絶縁層のいずれかであることを特徴とする、請求項 1 に記載のスピン注入デバイス。

**【請求項 3】**

前記スピン注入部の注入接合部が、前記スピン偏極電子についてスピン保存伝導可能及びトンネル接合可能のいずれかであることを特徴とする、請求項 1 又は 2 に記載のスピン注入デバイス。

**【請求項 4】**

前記スピン注入部のスピン偏極部が、強磁性層であることを特徴とする、請求項 1 ～ 3 の何れかに記載のスピン注入デバイス。

**【請求項 5】**

前記スピン注入部のスピン偏極部が、強磁性層のスピンを固定する反強磁性層を接して設けたことを特徴とする、請求項 1 ～ 3 の何れかに記載のスピン注入デバイス。

**【請求項 6】**

前記スピン注入部の注入接合部と接合した S y A F の第 1 の磁性層及び第 2 の磁性層のアスペクト比が 2 以下であることを特徴とする、請求項 1 ～ 5 の何れかに記載のスピン注入デバイス。

**【請求項 7】**

非磁性層を介して磁氣的に反平行に結合した磁化の大きさが異なる第 1 の磁性層及び第 2 の磁性層を有するとともに、この第 1 の磁性層及び第 2 の磁性層の磁化が反平行状態を維持したまま磁化反転可能なフリー層と、  
上記フリー層と絶縁層を介してトンネル接合した強磁性固定層と、を備え、  
上記強磁性固定層と上記フリー層とが強磁性スピントンネル接合した、スピン注入磁気装置。

**【請求項 8】**

前記構成に加え、前記フリー層に接合する注入接合部とスピン偏極部とを有するスピン注入部を備えたことを特徴とする、請求項 7 に記載のスピン注入磁気装置。

**【請求項 9】**

前記スピン注入部の注入接合部が、非磁性導電層及び非磁性絶縁層のいずれかであることを特徴とする、請求項 8 に記載のスピン注入磁気装置。

**【請求項 10】**

前記スピン注入部の注入接合部が、前記スピン偏極電子についてスピン保存伝導可能及びトンネル接合可能のいずれかであることを特徴とする、請求項 8 又は 9 に記載のスピン注入磁気装置。

**【請求項 11】**

前記スピン注入部のスピン偏極部が、強磁性層であることを特徴とする、請求項 8 ～ 10 の何れかに記載のスピン注入磁気装置。

**【請求項 12】**

前記スピン注入部のスピン偏極部が、強磁性層のスピンを固定する反強磁性層を接して設けたことを特徴とする、請求項 8 ～ 10 の何れかに記載のスピン注入磁気装置。

**【請求項 13】**

前記スピン注入部の注入接合部と接合したフリー層の第 1 の磁性層及び第 2 の磁性層の

アスペクト比が2以下であることを特徴とする、請求項7～12の何れかに記載のスピ  
ン注入磁気装置。

【請求項14】

前記スピ  
ン注入部をワード線としたことを特徴とする、請求項8～13の何れかに記載  
のスピ  
ン注入磁気装置。

【請求項15】

強磁性固定層を含むスピ  
ン偏極部と非磁性層の注入接合部とからなるスピ  
ン注入部と、  
該スピ  
ン注入部に接して設けられる強磁性フリー層と、を含むスピ  
ン注入デバイスにおい  
て、

上記非磁性層が絶縁体または導電体からなり、上記強磁性フリー層の表面に非磁性層が  
設けられ、上記スピ  
ン注入デバイスの膜面垂直方向に電流を流し、上記強磁性フリー層の  
磁化を反転させることを特徴とする、スピ  
ン注入デバイス。

【請求項16】

前記強磁性フリー層はC oまたはC o合金であり、前記強磁性フリー層の表面に設けら  
れる非磁性層はR u層であり、その膜厚が0. 1～20nmであることを特徴とする、請  
求項15に記載スピ  
ン注入デバイス。

【請求項17】

強磁性固定層を含むスピ  
ン偏極部と非磁性層の注入接合部とからなるスピ  
ン注入部と、  
該スピ  
ン注入部に接して設けられる強磁性フリー層と、を含むスピ  
ン注入デバイスにお  
いて、

上記非磁性層が絶縁体または導電体からなり、

上記強磁性フリー層の表面に非磁性層と強磁性層とが設けられ、

上記スピ  
ン注入デバイスの膜面垂直方向に電流を流し、上記強磁性フリー層の磁化を反  
転させることを特徴とする、スピ  
ン注入デバイス。

【請求項18】

前記強磁性フリー層及び前記強磁性層はC oまたはC o合金であり、前記強磁性フリー  
層の表面に設けられる非磁性層はR u層であり、その膜厚が2～20nmであることを特  
徴とする、請求項17に記載スピ  
ン注入デバイス。

【請求項19】

前記請求項15～18のいずれかに記載のスピ  
ン注入デバイスを用いたことを特徴とす  
る、スピ  
ン注入磁気装置。

【請求項20】

前記請求項15～18のいずれかに記載のスピ  
ン注入デバイスを用いたことを特徴とす  
る、スピ  
ン注入磁気メモリ装置。

## 【書類名】明細書

【発明の名称】スピン注入デバイス及びこれを用いた磁気装置

## 【技術分野】

【0001】

この発明は電子のスピンを制御した機能デバイス、特に超ギガビット大容量・高速・不揮発性磁気メモリに利用し、より小さな電流密度でスピン注入磁化反転可能にするためのスピン注入デバイスと、これを用いたスピン注入磁気装置並びにスピン注入磁気メモリ装置に関する。

## 【背景技術】

【0002】

近年、強磁性層／非磁性金属層／強磁性層からなる巨大磁気抵抗（GMR）効果素子および強磁性層／絶縁体層／強磁性層からなる強磁性スピントンネル接合（MTJ）素子が開発され、新しい磁界センサーや磁気メモリ（MRAM）への応用が期待されている。

GMRは、外部磁場によって2つの強磁性層の磁化を互いに平行あるいは反平行に制御することにより、界面でのスピン依存散乱によって抵抗が互いに異なることに起因して巨大磁気抵抗効果が得られている。一方、MTJでは、外部磁場によって2つの強磁性層の磁化を互いに平行あるいは反平行に制御することにより、膜面垂直方向のトンネル電流の大きさが互いに異なる、いわゆるトンネル磁気抵抗（TMR）効果が得られる（例えば、非特許文献1参照）。

【0003】

トンネル磁気抵抗率TMRは、用いる強磁性体と絶縁体との界面におけるスピン分極率Pに依存し、二つの強磁性体のスピン分極率をそれぞれP<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>とすると、一般に次の式（1）で与えられることが知られている。

【0004】

$$TMR = 2 P_1 P_2 / (1 - P_1 P_2) \quad (1)$$

ここで、強磁性体のスピン分極率Pは $0 < P \leq 1$ の値をとる。

【0005】

現在、得られている室温における最大のトンネル磁気抵抗率TMRはP～0.5のCoFe合金を用いた場合の約50パーセントである。

GMR素子はすでにハードディスク用磁気ヘッドに実用化されている。MTJ素子は現在、ハードディスク用磁気ヘッドおよび不揮発性磁気メモリ（MRAM）への応用が期待されている。

MRAMではMTJ素子をマトリックス状に配置し、別に設けた配線に電流を流して磁界を印加することで、各MTJ素子を構成する二つの磁性層を互いに平行、反平行に制御することにより、“1”、“0”を記録させる。読み出しはTMR効果を利用して行う。しかし、MRAMでは大容量化のために素子サイズを小さくすると、反磁界の増大により磁化反転に必要な電流が増し、消費電力が増大するという解決すべき課題を抱えている。

【0006】

このような課題を解決する方法としては、非磁性金属層を介して二つの磁性層が互いに反平行に結合している三層構造（人工反強磁性膜、Synthetic Antiferromagnetit、以下「SyAF」と記載する。）が提案されている（例えば、特許文献1参照）。

【0007】

このようなSyAF構造を用いると反磁界が軽減するため、素子サイズを小さくしても磁化反転に必要な磁場が低減される。

一方、最近、電流磁場を用いない新しいスピン反転法が理論的に提案され（例えば、非特許文献2参照）、実験的にも実現されている（例えば、非特許文献3参照）。

【0008】

このスピン反転法は、図15にその原理を示すように、第1の強磁性層61／非磁性金属層63／第2の強磁性層65からなる三層構造において、第2の強磁性層63から第1

の強磁性層 61 に電流を流すと、第 1 の強磁性層 61 から非磁性金属層 63 を介して第 2 の強磁性層 65 にスピン偏極電子が注入され、第 2 の強磁性層 65 のスピンの反転するというものであり、スピン注入による磁化反転と呼ばれている。

#### 【0009】

このスピン注入磁化反転は三層構造において、第 1 の強磁性層 61 のスピンの固定されているとすると、第 1 の強磁性層 61 から非磁性金属層 63 を経てスピン注入すると、注入した上向きスピン（多数スピン）が第 2 の強磁性層 65 のスピンのトルクを与え、そのスピンを同じ向きにそろえる。したがって、第 1 の強磁性層 61 と第 2 の強磁性層 65 のスピンの平行になる。

#### 【0010】

一方、電流の向きを逆に与え、第 2 の強磁性層 65 から第 1 の強磁性層 61 にスピン注入すると、第 1 の強磁性層 61 と非磁性金属層 63 との界面で下向きスピン（少数スピン）が反射し、反射したスピンの第 2 の強磁性層 65 のスピンのトルクを与え、そのスピンを同じ向き、つまり下向きにそろえようとする。その結果、第 1 の強磁性層 61 と第 2 の強磁性層 65 のスピンの反平行になる。

したがって、この三層構造のスピン注入磁化反転では、電流の向きを変えることによって第 1 の強磁性層と第 2 の強磁性層のスピンの平行にしたり反平行にしたりできる。

#### 【0011】

【特許文献 1】特開平 9-251621 号公報（フロントページ、第 1 図）

【非特許文献 1】T. Miyazaki and N. Tezuka, "Spin polarized tunneling in ferromagnet/insulator/ferromagnet junctions", (1995), J. Magn. Magn. Mater., L39, p. 1231

【非特許文献 2】J. C. Slonczewski, "Current-driven excitation of magnetic multilayer", (1996), J. Magn. Magn. Mater., 15, L1-L7

【非特許文献 3】J. A. Katine, F. J. Albert, R. A. Ruhman, E. B. Myers and D. C. Ralph, "Current-Driven Magnetization Reversal and Spin-wave Excitation in Co/Cu/Co Pillars", (2000), Phys. Rev. Lett., 84, pp. 3149-3152

#### 【発明の開示】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0012】

しかしながら、このようなスピン注入法は将来のナノ構造磁性体のスピン反転法として有望であるが、スピン注入による磁化反転に必要な電流密度が  $10^7 \text{ A/cm}^2$  以上と非常に大きく、これが実用上の解決すべき課題となっていた。

#### 【0013】

ところが、本発明者らは、非磁性金属層を介して二つの強磁性層が互いに反平行に結合している三層構造に、別に設けた非磁性金属層あるいは絶縁層を介して強磁性層から電流を流すと、より小さな電流密度でスピン注入による磁化反転を起こすことができることを見出した。

さらに、上記三層構造の代りに強磁性自由層及び非磁性層からなる二層構造及び強磁性自由層、非磁性層、強磁性層からなる三層構造を用いても、上記と同様な作用効果が得られることを見出した。

#### 【0014】

そこで、本発明は、より小さな電流密度でスピン注入磁化反転することができる、スピン注入デバイスと、このスピン注入デバイスを用いた磁気装置並びに磁気メモリ装置を提供することを目的とするものである。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0015】

上記目的を達成するために、本発明のスピン注入デバイスのうち、請求項 1 記載の発明は、スピン偏極部と注入接合部とを有するスピン注入部と、非磁性層を介して磁気的に反平行に結合した磁化の大きさが異なる第 1 の磁性層及び第 2 の磁性層を有する S y A F と

を備え、S y A F と注入接合部とが接合しており、スピン注入部からスピン偏極電子を注入し第1の磁性層及び上記第2の磁性層の磁化が反平行状態を維持したまま磁化反転する構成とした。

#### 【0016】

請求項2記載の発明は、上記構成に加え、スピン注入部の注入接合部が、非磁性導電層及び非磁性絶縁層のいずれかであることを特徴とする。

請求項3記載の発明は、スピン注入部の注入接合部が、スピン偏極電子についてスピン保存伝導可能及びトンネル接合可能のいずれかであることを特徴とするものである。

請求項4記載の発明は、スピン注入部のスピン偏極部が、強磁性層であることを特徴とする。

請求項5記載の発明は、スピン注入部のスピン偏極部が、強磁性層のスピンを固定する反強磁性層を接して設けたことを特徴とする。

請求項6記載の発明は、スピン注入部の注入接合部と接合したS y A F の第1の磁性層及び第2の磁性層のアスペクト比が2以下であることを特徴とする。

#### 【0017】

このような構成のスピン注入デバイスでは、スピン偏極部から注入接合部を介してスピン注入すると、S y A F のスピンが反平行状態を維持したまま磁化反転する。したがって、本発明のスピン注入デバイスはより小さな電流密度で磁化反転を起こすことができる。

#### 【0018】

本発明のスピン注入磁気装置のうち、請求項7記載の発明は、非磁性層を介して磁氣的に反平行に結合した磁化の大きさが異なる第1の磁性層及び第2の磁性層とを有するとともに、第1の磁性層と第2の磁性層の磁化が反平行状態を維持したまま磁化反転可能なフリー層と、フリー層と絶縁層を介してトンネル接合した強磁性固定層とを備え、強磁性固定層とフリー層とが強磁性スピントンネル接合した構成としたものである。

また請求項8記載の発明は、上記構成に加え、フリー層に接合する注入接合部とスピン偏極部とを有するスピン注入部を備えたことを特徴とする。

#### 【0019】

請求項9記載の発明は、スピン注入部の注入接合部が、非磁性導電層及び非磁性絶縁層のいずれかであることを特徴とする。

請求項10記載の発明は、スピン注入部の注入接合部が、スピン偏極電子についてスピン保存伝導可能及びトンネル接合可能のいずれかであることを特徴とする。

請求項11記載の発明は、スピン注入部のスピン偏極部が強磁性層であることを特徴とする。

請求項12記載の発明は、スピン注入部のスピン偏極部が、強磁性層のスピンを固定する反強磁性層を接して設けたことを特徴とする。

請求項13記載の発明は、スピン注入部の注入接合部と接合したフリー層の第1の磁性層及び第2の磁性層のアスペクト比が2以下であることを特徴とするものである。

請求項14記載の発明は、スピン注入部の注入接合部をワード線としたことを特徴とする。

#### 【0020】

この構成のスピン注入磁気装置では、スピン注入するとフリー層の磁化反転が起き、固定層の磁化と平行又は反平行となることによりトンネル磁気抵抗効果が出現する。したがって、本発明のスピン注入磁気装置は、より小さな電流密度でスピン注入によるフリー層の磁化反転を起こすことができる。

#### 【0021】

本発明のスピン注入デバイスのうち、請求項15記載の発明は、強磁性固定層を含むスピン偏極部と非磁性層の注入接合部とからなるスピン注入部と、スピン注入部に接して設けられる強磁性フリー層と、を含むスピン注入デバイスにおいて、非磁性層が絶縁体または導電体からなり、強磁性フリー層の表面に非磁性層が設けられ、スピン注入デバイスの

膜面垂直方向に電流を流し、強磁性フリー層の磁化を反転させることを特徴とする。

請求項 16 記載の発明は、強磁性フリー層は Co または Co 合金であり、強磁性フリー層の表面に設けられる非磁性層は Ru 層であり、その膜厚が 0.1 ~ 20 nm であることを特徴とする。

また、本発明のスピニ注入デバイスのうち、請求項 17 記載の発明は、強磁性固定層を含むスピニ偏極部と非磁性層の注入接合部とからなるスピニ注入部と、スピニ注入部に接して設けられる強磁性フリー層と、を含むスピニ注入デバイスにおいて、非磁性層が絶縁体または導電体からなり、強磁性フリー層の表面に非磁性層と強磁性層とが設けられ、スピニ注入デバイスの膜面垂直方向に電流を流し、強磁性フリー層の磁化を反転させることを特徴とする。

請求項 18 記載の発明は、強磁性フリー層及び強磁性層は Co または Co 合金であり、強磁性フリー層の表面に設けられる非磁性層は Ru 層であり、その膜厚が 2 ~ 20 nm であることを特徴とする。

#### 【0022】

この構成のスピニ注入デバイスでは、スピニ偏極部から注入接合部を介してスピニ注入すると、強磁性フリー層が磁化反転する。したがって、本発明のスピニ注入デバイスはより小さな電流密度で磁化反転を起こすことができる。

#### 【0023】

また、本発明のスピニ注入磁気装置である請求項 19 記載の発明は、請求項 15 ~ 18 のいずれかに記載のスピニ注入デバイスを用いたことを特徴とする。この構成のスピニ注入磁気装置では、スピニ注入すると強磁性フリー層の磁化反転が起き、強磁性固定層の磁化と平行又は反平行となることにより、巨大磁気抵抗効果またはトンネル磁気抵抗効果が出現する。したがって、本発明のスピニ注入磁気装置は、より小さな電流密度でスピニ注入による強磁性フリー層の磁化反転を起こすことができる。

#### 【0024】

また、本発明のスピニ注入磁気メモリ装置である請求項 25 記載の発明は、請求項 15 ~ 18 のいずれかに記載のスピニ注入デバイスを用いたことを特徴とする。この構成のスピニ注入磁気メモリ装置では、スピニ注入すると強磁性フリー層の磁化反転が起き、強磁性固定層の磁化と平行又は反平行となることにより、巨大磁気抵抗効果またはトンネル磁気抵抗効果が出現する。したがって、本発明のスピニ注入磁気メモリ装置は、より小さな電流密度でスピニ注入による強磁性フリー層の磁化反転によるメモリ装置を提供することができる。

#### 【発明の効果】

#### 【0025】

本発明のスピニ注入デバイスによれば、小さな電流密度で磁化反転を起こすことができるという効果を有する。また本発明のスピニ注入磁気装置は、より小さな電流密度でスピニ注入による MTJ のフリー層の磁化反転を起こすことができる。

したがって、超ギガビット大容量・高速・不揮発の MRAM をはじめ種々の磁気装置や磁気メモリ装置に利用可能になる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

#### 【0026】

以下、図面に示した実施形態に基づいて本発明を詳細に説明する。各図において同一又は対応する部材には同一符号を用いる。

図 1 は本発明のスピニ注入デバイスの概念図であり、(a) は SyAF のスピニが下向きの状態、(b) はスピニ注入により SyAF のスピニが上向きになった状態を示す概念図である。

#### 【0027】

図 1 に示すように、本発明のスピニ注入デバイス 10 は、スピニ偏極部 9 と注入接合部 7 とを有するスピニ注入部 1 と、反強磁性結合する非磁性層 2 を介して第 1 の磁性層 4 と第 2 の磁性層 6 とが三層構造を形成する SyAF 3 とを備え、これらが積層構造を形成す



る。

まず、本発明に係る SyAF3 について説明する。

強磁性体が単層膜の磁化反転に必要な磁場  $H_{sw}$  は、一軸磁気異方性  $K_u$ 、飽和磁化  $M_s$ 、膜厚  $t$ 、幅  $w$  を用いて一般に次の式 (2) で与えられる。

【0028】

$$H_{sw} = 2K_u / M_s + C(k) t M_s / w \quad (2)$$

ここで、第1項は磁気異方性による項、第2項は反磁界による項である。

【0029】

一方、同様に単磁区構造をとる場合、二つの強磁性層の膜厚  $t_1$ 、 $t_2$ 、飽和磁化  $M_1$ 、 $M_2$  をもつ SyAF の磁化反転磁場は次式 (3) で与えられる。

【0030】

$$H_{sw} = 2K_u / \Delta M + C(k) (t_1 + t_2) \Delta M / w \quad (3)$$

ここで、 $\Delta M = (t_1 + t_2) / (M_1 t_1 - M_2 t_2)$ 、 $w$  は SyAF の幅である。

【0031】

上記式 (2) 及び式 (3) において、 $C(k)$  はアスペクト比  $k$  に依存する反磁界係数であり、 $k$  が 1 に近づくほど小さくなり、 $k=1$  では  $C(k)=0$  である。ここで、アスペクト比  $k$  は、 $t/w$  である。したがって、第1の磁性層 4 の場合には  $t_1/w$  であり、第2の磁性層 6 の場合には、 $t_2/w$  である (図1(a) 参照)。

微小な素子の場合、一般に式 (2)、式 (3) とともに第2項の方が第1項を上回るのも、また  $\Delta M < M_s$  であるから、 $w$  が同じとき SyAF の方が磁化反転磁場が小さくなる。一方、 $C(k)$  は  $k=1$  のときゼロとなるので、磁化反転磁場は式 (2)、式 (3) の第1項、すなわち磁気異方性によって決定され、素子サイズに依存しなくなる。

しかし、単層膜の場合には  $k$  が少なくとも 2 以下では多磁区構造となるため、磁化反転磁場は式 (2) では与えられず、その値は、より大きくなるとともに素子サイズに依存する。したがって、単層膜の場合には  $k \leq 2$  の素子は現実的でない。

【0032】

ところが本発明者らは、本発明に係る SyAF の場合には  $k \leq 2$ 、特に  $k=1$  でも単磁区構造になることを見出した。その結果、本発明に係る SyAF は、より小さな磁化反転磁場を得ることができ、特に  $k=1$  の素子では磁化反転磁場は素子サイズに依存しない。本発明はこの発見に基づいており、SyAF にスピン偏極電子を注入することで、より小さな電流密度で磁化反転を実現することができる。特に、 $k=1$  の場合には  $C(k)$  がゼロになるため、磁化反転磁場が著しく小さくなる。

【0033】

このような本発明に係る SyAF3 は、図1(a) 及び (b) を参照して、非磁性層 2 を介して第1の磁性層 4 と第2の磁性層 6 との二つの磁性層が互いに反平行に磁気結合している三層構造であり、それぞれの膜厚はナノメートルサイズで形成されている。この SyAF3 にスピン注入部 1 の非磁性金属層の注入接合部 7 を介して強磁性層のスピン偏極部 9 からスピン注入することで、SyAF3 の磁化反転を実現する。

【0034】

非磁性層 2 はこれを介した両磁性層の磁化を反強磁性結合させる物質であり、この反強非磁性層として、ルテニウム (Ru)、イリジウム (Ir)、ロジウム (Rh) が利用可能である。なお、図1(a) 中、5 及び 8 は電流を流すための端子を示している。強磁性層及び磁性層は導電体であるので電極との兼用ができるが、電極を別に設けて電流を流してもよい。

【0035】

図1(b) に示すように、本発明に係る SyAF3 においては、第1の磁性層 4 のスピンと第2の磁性層 6 のスピンとが反平行状態を維持したまま磁氣的に結合している。すなわち、第1の磁性層 4 の磁化と第2の磁性層 6 の磁化とは、大きさの異なる反平行状態の磁化、つまり大きさの異なる反平行状態のスピンを有している。

第1の磁性層4の厚さを $t_1$ 、磁化を $M_1$ とし、第2の磁性層6の厚さを $t_2$ 、磁化を $M_2$ とすると、磁化の大きい方の向き( $t_1 M_1 - t_2 M_2$ )を図1中の強磁性層9のスピンを示す矢印に対してS y A Fのスピンの向き $\uparrow$ 又は $\downarrow$ とすることができる。S y A F 3の磁性層4及び磁性層6の反平行磁化の大きさに差異を設けるには、 $t_1 M_1$ と $t_2 M_2$ とが異なるようにすればよい。

#### 【0036】

スピン注入部1は強磁性層からなるスピン偏極部9と非磁性導電層からなる注入接合部7とを積層した構造であり、非磁性導電層の注入接合部7はナノメートルサイズである。ここで、ナノメートルサイズとは電子がその運動量とスピンを保存したまま伝導可能な大きさを意味する。つまり、この注入接合部7はスピン保存伝導可能な大きさである。

金属の場合、電子の平均自由行程は $1\mu\text{m}$ 以下であり、この $1\mu\text{m}$ 以下のサイズの素子では、注入されたスピンは緩和することなく他方に流れ込むことができる。

スピン注入部1の注入接合部7は図2に示すように非磁性絶縁層12であってもよい。この非磁性絶縁層12はトンネル電流が流れるトンネル接合可能な大きさのナノメートルサイズであり、数nmである。

#### 【0037】

強磁性層からなるスピン偏極部9は強磁性体であるが、伝導を担うフェルミ面でのアップスピン電子とダウンスピン電子の数が異なっており、この強磁性層のスピン偏極部9からスピン偏極した電子が非磁性金属層の注入接合部7に流れ込むようになっている。

#### 【0038】

このような本発明に係るスピン注入デバイスでは、1ミリアンペア(mA)以下の非常に小さな電流を流して、膜面内垂直方向に強磁性層のスピン偏極部9から非磁性金属層(又は非磁性絶縁層12)の注入接合部7を介してスピン注入すると、S y A F 3の磁性層4のスピンの向きと磁性層6のスピンの向きとが反平行状態を維持したまま磁化反転する。したがって、本発明のスピン注入デバイスでは、より小さな電流密度でスピン注入による磁化反転ができる。これにより電流を流して磁界を印加することなく、微小な電流を流すだけでスピン注入磁化反転ができるので、ロジック、メモリ及びストレージを備えたスピン注入デバイスが実現可能となる。

#### 【0039】

次に、第2の実施の形態を説明する。図3は本発明のスピン注入デバイスに係る第2の実施形態を示す概略図である。図3を参照すると、この実施形態のものは、スピン偏極部9が反強磁性層21と強磁性層23とを有する構造であり、強磁性層23に反強磁性層21を近接させることで強磁性層23のスピンを固定している。また、注入接合部はスピン保存伝導可能な非磁性金属層25であり、これに代えてトンネル接合可能な絶縁層を用いてもよい。このような構成ではスピン偏極部のスピンを固定してスピン注入し、S y A Fの磁化反転ができる。

#### 【0040】

次に、第3の実施の形態を説明する。図4は第3の実施形態のスピン注入デバイスを示す概略図である。図4を参照すると、このスピン注入デバイス14は、反強磁性層21と強磁性固定層26とからなるスピン偏極部9と、強磁性固定層に接して設けられる注入接合部となる非磁性層7と、非磁性層7上に強磁性フリー層27及び非磁性層28からなる二層構造を備えている。

スピン注入部1は、スピン偏極部9と注入接合部7とからなっていて、スピン偏極部9において、強磁性固定層26に反強磁性層21を近接させることで強磁性固定層26のスピンを固定している。

また、注入接合部7はスピン保存伝導可能なCuなどの非磁性金属層25であり、これに代えてトンネル接合可能な絶縁層12を用いてもよい。

#### 【0041】

第3実施形態のスピン注入デバイス14が図3に示したスピン注入デバイスと異なるのは、S y A F 3の代りに強磁性フリー層27及び非磁性層28を備えていることである。

非磁性層 28 は強磁性フリー層 27 との界面において、多数（マジョリティ）スピンを反射させ、少数（マイノリティ）スピンを透過させるために設けている。したがって、非磁性層 28 の膜厚は、少数スピンのスピンを保存したまま動ける距離、すなわちスピン拡散長以内にしておけばよい。

ここで、強磁性フリー層 27 としては Co または Co 合金を用いることができる。非磁性層 28 としては、Ru、Ir、Rh が利用可能であり、特に Ru を用いるのが好適である。また、Ru のスピン拡散長は 14 nm であることが知られており、Ru の膜厚は 0.1 nm ~ 20 nm とすればよい。以下、強磁性フリー層 27 に Co または Co 合金を用い、非磁性層 28 に Ru を用いるとして説明する。

#### 【0042】

図 5 は上記第 3 の実施形態のスピン注入デバイス 14 の磁化反転を説明する模式図である。図 5 において、強磁性固定層 26 から強磁性フリー層 27 へ電子が注入されると、多数スピン電子 17 が強磁性フリー層 27 の磁化を強磁性固定層 26 の磁化に揃うようにトルク 18 を与える。この際、Co または Co 合金 27 と Ru 28 の界面においては、多数スピン電子が強く散乱（反射）され、少数スピン電子はあまり散乱を受けない（透過）ことが知られている。

したがって、図 5 に示すように、Co または Co 合金 27 と Ru 28 の界面において反射された多数スピン電子 19 は、Co または Co 合金 27 の膜厚がスピン伝導が保存される程度に薄ければ、この反射された多数スピン電子 19 も強磁性フリー層 27 に同様のトルク 18' を与える。これにより、実質的に強磁性フリー層 27 のトルクが増大し、強磁性固定層 26 の磁化と同じ向きになる。

#### 【0043】

一方、電流の向きを逆に与え、Ru 層 28 から Co または Co 合金 27 側に電子を注入すると、多数スピン電子は Co または Co 合金 27 と Ru 28 の界面で反射され、少数スピン電子だけが Co または Co 合金からなる強磁性フリー層 27 に注入され、この少数スピン電子が強磁性フリー層 27 のスピンのトルクを与え、そのスピンを同じ向き、つまり下向きにそろえようとする。これにより、強磁性フリー層 27 の少数スピン電子によるトルクが増大し、強磁性フリー層 27 のスピンは強磁性固定層 26 の磁化と反平行になる。

このように本発明のスピン注入デバイス 14 によれば、非磁性層 28 の挿入により、スピン偏極部 9 のスピンを固定してスピン注入し、強磁性フリー層 27 の磁化反転を従来のスピン注入磁化反転よりも低い電流密度で行うことができる。

#### 【0044】

さらに、第 4 の実施の形態のスピン注入デバイスを図 6 を参照して説明する。この実施形態のスピン注入デバイス 16 が図 4 に示したスピン注入デバイス 14 と異なるのは、非磁性層 28 上にさらに強磁性固定層 29 を備えている点にある。他の構成は図 4 に示すスピン注入デバイス 14 と同じであるので説明は省略する。

ここで、強磁性フリー層 27 及び強磁性固定層 29 は、SyAF3 のようにそれらの磁化が反平行とならないように、かつ、スピン保存伝導が生起するように非磁性層 28 の膜厚を決めればよい。したがって、強磁性フリー層 27 及び強磁性固定層 29 として Co または Co 合金を、非磁性層 28 として Ru を用いた場合には、Ru の厚さは、SyAF3 とならないように、2 ~ 20 nm 程度とすればよい。

#### 【0045】

次に、上記第 4 の実施形態のスピン注入デバイス 16 の動作について説明する。

図 6 において、強磁性固定層 26 から強磁性フリー層 27 へ電子が注入された場合には、第 3 実施形態のスピン注入デバイス 14 と同様に、Co または Co 合金からなる強磁性フリー層 27 の磁化は、強磁性固定層 26 の磁化と同じ向きになる。

#### 【0046】

一方、電流の向きを逆に与えた場合を、図 7 を参照して説明する。

図 7 は、第 4 実施形態のスピン注入デバイス 16 の磁化反転を説明する模式図である。図 7 において、強磁性固定層 29 から強磁性フリー層 27 へ電子が注入されると、多数ス

ピン電子 37 が強磁性固定層 29 と Ru 層 28 の界面で強く反射され、強磁性フリー層 27 へは到達しない。この際、Co または Co 合金 27 の膜厚がスピン伝導が保存される程度に薄ければ、少数スピン電子 39 は散乱を受けないので強磁性フリー層 27 に到達し、強磁性フリー層 27 のスピンを揃えるようにトルク 38 を与える。したがって、強磁性フリー層 27 の磁化は、強磁性固定層 26 とは反平行となる。これにより、Ru 層 28 がない場合よりも、多数スピン電子 37 が強磁性フリー層 27 に到達しなくなり、より小さい電流密度で磁化反転ができる。

このように、本実施形態のスピン注入デバイス 16 によれば、スピン偏極部 9 のスピンを固定してスピン注入し、SyAF3 の代りに用いる強磁性フリー層 27、非磁性層 28、強磁性固定層 29 において、強磁性フリー層 27 の磁化反転を低電流密度で行うことができる。

#### 【0047】

上記スピン注入デバイスにおいて、強磁性フリー層 27 の磁化反転が起こるとき、強磁性固定層 26 の磁化と平行又は反平行となることにより、反強磁性層 21 と強磁性固定層 26 と Cu などの非磁性金属層 25 からなる注入接合部 7 と強磁性フリー層 27 とを含む層構造は、CPP 型の巨大磁気抵抗効果素子と同じように、巨大磁気抵抗効果が生じる。

また、非磁性層 7 がトンネル接合可能な絶縁層 12 である場合に強磁性フリー層 27 の磁化反転が起こると、反強磁性層 21 と強磁性固定層 26 とトンネル接合可能な絶縁層 12 と強磁性フリー層 27 とを含む層構造は、CPP 型のトンネル磁気抵抗効果素子と同じように、トンネル磁気抵抗効果が生じる。

#### 【0048】

次に、本発明のスピン注入磁気装置について説明する。図 8 は本発明のスピン注入磁気装置の概略図である。スピン注入磁気装置 30 は、フリー層とした SyAF3 と、強磁性層 32 及び反強磁性層 34 からなる固定層 31 とが、絶縁層 33 でトンネル接合した強磁性スピントンネル接合 (MTJ) 素子 36 であって、この MTJ 素子 36 に強磁性層であるフリー層を磁化反転させるためのスピン注入部 1 を備えている。スピン注入部 1 は注入接合部をトンネル接合可能な絶縁層 12 にしたものである。

#### 【0049】

このようなスピン注入磁気装置では、強磁性層 23 から絶縁層 12 を介して SyAF3 にスピン注入すると、この SyAF3 の磁化が反転する。この SyAF3 であるフリー層の磁化が  $\uparrow$  又は  $\downarrow$  に反転して固定層 31 の磁化と平行又は反平行となることにより、トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果が出現する。したがって、このスピン注入磁気装置 30 は、より小さな電流密度でスピン注入によるフリー層の磁化反転を起こすことができる。

#### 【0050】

上記スピン注入磁気装置において、SyAF3 を、図 4 に示した第 3 実施形態のスピン注入デバイス 14 の強磁性フリー層 27 及び強磁性自由層上に設ける非磁性層 28 からなる二層構造に代えた構成としてもよい。

また、上記スピン注入磁気装置において、SyAF3 を、図 6 に示した第 4 実施形態のスピン注入デバイス 16 の強磁性フリー層 27、非磁性層 28、非磁性層上に設ける強磁性層 29 からなる三層構造に代えた構成としてもよい。

#### 【0051】

このように本発明のスピン注入磁気装置は、超ギガビット大容量・高速・不揮発メモリに利用可能になる。

#### 【0052】

このようなスピン注入磁気装置では、フリー層の SyAF をトンネル接合可能な絶縁膜で挟み又は覆って、この SyAF に対応する部分のスピン注入部でワード線として結合して微細加工し、固定層側の強磁性層にビット線を連結して微細加工することにより、MRAM やスピン注入磁気メモリ装置の基本構造とすることができる。

ここで、フリー層は SyAF の他には、強磁性フリー層 27 及び非磁性層 28 からなる二層構造または強磁性フリー層 27、非磁性層 28、非磁性層上に設ける強磁性層 29 か

らなる三層構造を用いることができる。

#### 【0053】

次に、本発明のスピン注入デバイスやスピン注入磁気装置に用いることができる磁性薄膜について説明する。

図9は、本発明に用いることができる磁性薄膜の断面図である。図9に示すように、磁性薄膜41は、基板42上に、室温において $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ 薄膜43を配設している。ここで、 $0 \leq x \leq 1$ である。

$\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ 薄膜43は、室温で強磁性であり、電気抵抗率が $190\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 程度であり、かつ、基板を加熱することなくL21, B2, A2構造の何れか一つの構造を有している。

さらに、上記 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ 薄膜43を配設した基板を加熱することで、スピン分極率の大きいL21構造の $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ 薄膜43が得られやすい。ここで、基板42上の $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ 薄膜43の膜厚は、1nm以上1 $\mu\text{m}$ 以下であればよい。

#### 【0054】

図10は、本発明に用い得る磁性薄膜の変形例の断面図である。本発明に用いる磁性薄膜45は、図9の磁性薄膜41の構造において、さらに基板42と $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ （ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ）薄膜43との間にバッファ層44が挿入されている。バッファ層44を挿入することで、基板41上の $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ （ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ）薄膜43の結晶性をさらによくすることができる。

#### 【0055】

上記磁性薄膜41, 45に用いる基板42は、熱酸化Si、ガラスなどの多結晶、MgO、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、GaAsなどの単結晶を用いることができる。また、バッファ層44としては、Al, Cu, Cr, Fe, Nb, Ni, Ta, NiFeなどを用いることができる。

上記 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ （ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ）薄膜43の膜厚は、1nm以上で1 $\mu\text{m}$ 以下であればよい。この膜厚が1nm未満では実質的に後述するL21, B2, A2構造の何れか一つの構造を得るのが困難になり、そして、この膜厚が1 $\mu\text{m}$ を超えるとスピン注入デバイスとしての応用が困難になり好ましくない。

#### 【0056】

次に、上記構成の磁性薄膜の作用を説明する。

図11は、磁性薄膜に用いる $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ （ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ）の構造を模式的に説明する図である。図に示す構造は、bcc（体心立方格子）の慣用的単位胞の8倍（格子定数で2倍）の構造を示している。

$\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ のL21構造においては、図9のIの位置にFeとCrが組成比として $\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}$ （ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ）となるように配置され、IIの位置にAl、IIIとIVの位置にCoが配置される。

また、 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ のB2構造においては、図9のIの位置とIIの位置に、FeとCrとAlが不規則に配列される構造となる。この際、FeとCrの組成比は、 $\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}$ （ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ）となるように配置される。

さらに、 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ のA2構造においては、Co, Fe, CrおよびAlが不規則に置換した構造となる。この際、FeとCrの組成比は、 $\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}$ （ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ）となるように配置される。

#### 【0057】

次に、上記構成の磁性薄膜41, 45の磁気的性質を説明する。

上記構成の $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ （ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ）薄膜43は、室温で強磁性であり、かつ、基板を加熱することなくL21, B2, A2構造の何れか一つの構造の $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ 薄膜が得られる。

さらに、上記構成の $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$ 薄膜43（ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ）は膜厚が数nm程度の非常に薄い膜においてもL21, B2, A2構造の何れか一つの構造が得

られる。

ここで、 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$  (ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ) 薄膜のB2構造は、従来得られていない特異な物質である。B2構造は、 $\text{L}2_1$  構造と類似しているが、異なるのは $\text{L}2_1$  構造では、 $\text{Cr}(\text{Fe})$  と $\text{Al}$  原子が規則的に配置しているのに対し、B2構造は、不規則に配列していることである。また、A2構造は、 $\text{Co}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{Cr}$  および $\text{Al}$  が不規則に置換した構造となる。これらの違いはX線回折で測定することができる。

上記 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$  薄膜43の組成 $x$ において、 $0 \leq x \leq 0.8$  の範囲内では、特に、基板を加熱することなく $\text{L}2_1$ 、B2の何れか一つの構造を得ることができる。また、 $0.8 \leq x \leq 1.0$  では、A2構造が得られる。

また、組成 $x$ において、 $0 \leq x \leq 1$  の範囲内で、加熱した基板上的 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$  薄膜の成膜や、基板を加熱することなく成膜した後の熱処理などにより、 $\text{L}2_1$  またはB2構造が得られる。

#### 【0058】

上記構成の磁性薄膜41、45がハーフメタルであることを実験的に明らかにすることは難しいが、定性的にはトンネル接合を有するトンネル磁気抵抗効果素子を作製し、それが100%を超えるような非常に大きなTMRを示す場合にはハーフメタル的と考えることができる。

絶縁膜の片側に $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 薄膜43を強磁性層として用い、絶縁膜の他方の強磁性層にスピン分極率が0.5の $\text{CoFe}$ 合金を用いてトンネル磁気抵抗効果素子を作製した結果、100%を超える大きなTMRを得た。

#### 【0059】

これは(1)式から考えて、 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 薄膜43が、 $P=0.7$ 以上のスピン分極率をもつことを示している。このような大きなTMRを得ることができたのは、 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 薄膜3が大きなスピン分極率を有していることのほかに、室温で $\text{L}2_1$ 、B2、A2構造の何れか一つの構造が得られるという発見に基づく。

これにより、磁性薄膜41、45によれば、基板を加熱する必要がなく、 $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 薄膜43が1nm以上の厚みで強磁性特性を得ることができ、これは、表面が酸化したり表面粗さが増大したりすることがなく、トンネル接合の界面をクリーンでかつシャープに作製することができたことにより、大きなスピン分極率とトンネル磁気抵抗効果素子において大きなTMRを得ることができるものと推察される。

#### 【0060】

上記磁性薄膜41、45は、本発明のスピン注入デバイスに用いる $\text{SyAF3}$ の第1及び第2の磁性層、あるいは、スピン注入部の強磁性層9などに用いることができる。また、磁性薄膜41、45は、本発明のスピン注入デバイス14、16に用いる反強磁性層21と強磁性固定層26と $\text{Cu}$ などの非磁性金属層25と強磁性フリー層28とからなる層構造であるCPP型巨大磁気抵抗効果素子構造や、反強磁性層21と強磁性固定層26とトンネル接合可能な絶縁層12と強磁性フリー層28とからなる層構造であるトンネル磁気抵抗効果素子構造に用いることができる。さらに、本発明のスピン注入磁気装置に用いるMTJ素子あるいはトンネル磁気抵抗効果素子の強磁性層に用いることができる。

#### 【実施例1】

#### 【0061】

次に、実施例1について説明する。実施例1は、図4に示すスピン注入デバイス14の構造に相当するものである。

マグネトロンスパッタ法を用いて、熱酸化 $\text{Si}$ 基板上に $\text{Ta}$  (2nm) /  $\text{Cu}$  (20nm) /  $\text{IrMn}$  (10nm) /  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  (5nm) /  $\text{Cu}$  (6nm) /  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  (2.5nm) /  $\text{Ru}$  (0.45nm) /  $\text{Cu}$  (5nm) /  $\text{Ta}$  (2nm) を順にスパッタした。

ここで、熱酸化 $\text{Si}$ 基板上及びその最上層の $\text{Ta}$ と $\text{Cu}$ からなる層は電極となる層であ

る。IrMn層及びCo<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>層は、それぞれ、反強磁性層21及び強磁性固定層26からなるスピン偏極部9である。Cuは注入接合部7である。Co合金のCo<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>及びRuは非磁性層7のCu上に配設した強磁性フリー層27及び非磁性層28である。

次に、この膜を電子ビームリソグラフィとArイオンミリングを用いて微細加工し、図4に示すようなスピン注入デバイス14を作製した。素子サイズは300×100 nm<sup>2</sup>である。

#### 【0062】

図12は室温における実施例1のスピン注入デバイス14のスピン注入磁化反転を示す図である。図において、横軸は、強磁性フリー層27から強磁性固定層26への電流を正方向としたときのスピン注入デバイス電流(mA)を示し、縦軸はそのときの抵抗(Ω)を示している。最初に、スピン注入デバイス14に外部磁界Hを印加して、反平行状態、すなわち高抵抗の初期状態とした。このときの外部磁界Hは、500 e (エルステッド)である(図12のA参照)。

図から明らかなように、Aに示す微小電流の高抵抗状態から、正の向きにBで示す約5 mAまで電流を流していくと抵抗が急激に減少し、磁化反転していることが分かる。さらに、電流を20 mAまで増加してもこの低抵抗状態が保持されていることが分かる(図12のB~C参照)。

次に、電流を減少し、さらに負の方向に印加すると、約-7.5 mAまでは低抵抗を保持する(図12のC~D参照)。それ以上の負電流を印加すると再び高抵抗状態になり、磁化反転することが分かる(図12のE~F参照)。この磁化反転に要する電流密度は、 $2.4 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>であり、後述する比較例に比べ約1/10となった。また、磁気抵抗(MR)は図示するように0.97%であり、後述する比較例のスピン反転構造における磁気抵抗と同じ値が得られた。

これにより、実施例1のスピン注入デバイス14においては、それに流す電流の向きを変えて、強磁性フリー層27の磁化反転を発現させることで、その抵抗を変化させることができる。

#### 【実施例2】

##### 【0063】

次に、実施例2について説明する。実施例2は、図6に示すスピン注入デバイス16の構造に相当するものである。

マグネトロンスパッタ法を用いて、熱酸化Si基板上にTa(2 nm)/Cu(20 nm)/IrMn(10 nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(5 nm)/Cu(6 nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(2.5 nm)/Ru(6 nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(5 nm)/Cu(5 nm)/Ta(2 nm)を順にスパッタした。

ここで、熱酸化Si基板上及びその最上層のTaとCuからなる層は電極となる層である。IrMn層及びCo<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>層は、それぞれ、反強磁性層21と強磁性固定層26とからなるスピン偏極部9である。Cuは注入接合部7である。Co合金のCo<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>, Ru, Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>は、それぞれ、非磁性層7のCu上に配設した強磁性フリー層27, 非磁性層28, 強磁性層29である。

##### 【0064】

実施例2のスピン注入デバイス16が実施例1のスピン注入デバイス14と異なるのは、Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>27上のRu28の膜厚を0.45 nmから6 nmと厚くしたことで、強磁性層29として膜厚5 nmのCo<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>層29を設けたことである。

次に、実施例1と同じ方法で、素子サイズが100×100 nm<sup>2</sup>のスピン注入デバイス16を作製した。

##### 【0065】

図13は、室温における実施例2のスピン注入デバイス16のスピン注入磁化反転を示す図である。図において、横軸は、強磁性フリー層27から強磁性固定層26への電流を正方向としたときのスピン注入デバイス電流(mA)を示し、縦軸はそのときの抵抗(Ω)を示している。高抵抗の初期状態とするために印加した外部磁界Hは、1500 eであ

る。

図から明らかなように、実施例2のスピン注入デバイス16は、実施例1のスピン注入デバイス14と同様に電流が±約0.2mAで抵抗が変化し、磁化反転が発現することが分かる。この磁化反転に要する電流密度は $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ となった。この値は、実施例1の約 $1/24$ となり、後述する比較例の約 $1/200$ である。また、磁気抵抗は約1%であり、後述する比較例の磁気抵抗(MR)と同じ値が得られた。このように、非磁性層28であるRuの膜厚を6nmとすることにより、磁化反転に要する電流密度を低くすることができた。

#### 【実施例3】

##### 【0066】

次に、実施例3について説明する。実施例3は、図8に相当する構造に対するものである。

マグネトロンスパッタ法を用いて、熱酸化Si基板上にCu(100nm)/NiFe(3nm)/IrMn(10nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(3nm)をまず作製した。次にこの膜の上に厚さ3nmのSiO<sub>2</sub>をスパッタし、さらにその上にCo<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(1nm)/Ru(0.45nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(1.5nm)/SiO<sub>2</sub>(3nm)をスパッタした。次に、上部磁性層として、Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(10nm)/IrMn(10nm)/Ta(5nm)を成膜した。

##### 【0067】

この膜の断面を透過型電子顕微鏡を用いて調べた結果、Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(1nm)/Ru(0.45nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(1.5nm)はSiO<sub>2</sub>中に一層だけ層状に分散した粒子状をしており、SiO<sub>2</sub>を絶縁マトリックスとする二重トンネル構造であることがわかった。この構造に対して、上下のCuとTa膜間に電圧を印加して電流を流し、そのときの抵抗を電流を変化させて室温で測定した結果、約0.1mAで抵抗の飛びを観測した。これはCo<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(1nm)/Ru(0.45nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(1.5nm)SyAFの磁化反転に伴うTMRの発現によるものであり、スピン注入によって磁化反転したことを意味している。

##### 【0068】

(比較例)

次に、比較例について説明する。

比較例は、図15に示す従来のスピン反転法に用いる三層構造の第1の強磁性層61上にさらに反強磁性層を設けた構造である。すなわち、実施例1のスピン注入デバイス14においてRu層のない構造として、熱酸化Si基板上にTa(2nm)/Cu(20nm)/IrMn(10nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(5nm)/Cu(6nm)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(2.5nm)/Cu(5nm)/Ta(2nm)を順にスパッタした。次に、実施例1と同じ方法で、素子サイズを $300 \times 100 \text{ nm}^2$ とした。

##### 【0069】

図14は、室温における比較例の(a)磁気抵抗曲線と、(b)スピン注入磁化反転を示す図である。図14(a)において、横軸は印加する磁界(Oe)であり、縦軸は抵抗( $\Omega$ )である。素子電流は1mAである。磁気抵抗は、外部磁界が0(図14(a)のG参照)からスイープして測定した。

図14(a)から明らかなように、比較例の磁気抵抗(MR)は1.1%と、従来報告された値と同じ値であることが分かる。また、図14(b)において、横軸は、第2の強磁性層63から第1の強磁性層61へ電流を流した場合を正方向とした電流(mA)を示し、縦軸はそのときの抵抗( $\Omega$ )を示している。図14(b)から明らかなように、電流がほぼ0から矢印の方向に電流を正から負にすることで、実施例1と同様に磁化反転が発現した(図14(b)のK~L参照)。磁気抵抗は0.98%で、磁化反転に要する電流密度は $2.4 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ であった。

##### 【0070】

次に、実施例及び比較例の比較について説明する。



実施例においては、磁化反転に要する電流密度が、比較例よりも低下した。特に、実施例2のようにRu層28の膜厚を2~20nmの範囲内とすれば、磁化反転に要する電流密度が $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ となり、従来例の1/10の値に低減化できることが分かった。

#### 【0071】

本発明はこれら実施例に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載した発明の範囲内で種々の変形が可能であり、それらも本発明の範囲内に含まれることはいうまでもない。

#### 【図面の簡単な説明】

##### 【0072】

【図1】本発明の第1の実施形態のスピン注入デバイスの概念図であり、(a)はSyAFのスピンが下向きの状態、(b)はスピン注入によりSyAFのスピンが上向きになった状態を示す概念図である。

【図2】注入接合部が非磁性絶縁層である第1の実施形態のスピン注入デバイスの概略図である。

【図3】本発明のスピン注入デバイスの第2の実施形態を示す概略図である。

【図4】本発明のスピン注入デバイスの第3の実施形態を示す概略図である。

【図5】第3の実施形態のスピン注入デバイスの磁化反転を説明する模式図である。

【図6】本発明のスピン注入デバイスの第4の実施形態を示す概略図である。

【図7】第4の実施形態のスピン注入デバイスの磁化反転を説明する模式図である。

【図8】本発明のスピン注入磁気装置の概略図である。

【図9】本発明に用いることができる磁性薄膜の断面図である。

【図10】本発明に用いることができる磁性薄膜の変形例の断面図である。

【図11】磁性薄膜に用いる $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$  (ここで、 $0 \leq x \leq 1$ ) の構造を模式的に説明する図である。

【図12】室温における実施例1のスピン注入デバイスのスピン注入磁化反転を示す図である。

【図13】室温における実施例2のスピン注入デバイスのスピン注入磁化反転を示す図である。

【図14】室温における比較例の(a)磁気抵抗曲線と、(b)スピン注入磁化反転を示す図である。

【図15】従来のスピン磁化反転の原理を示す概略図である。

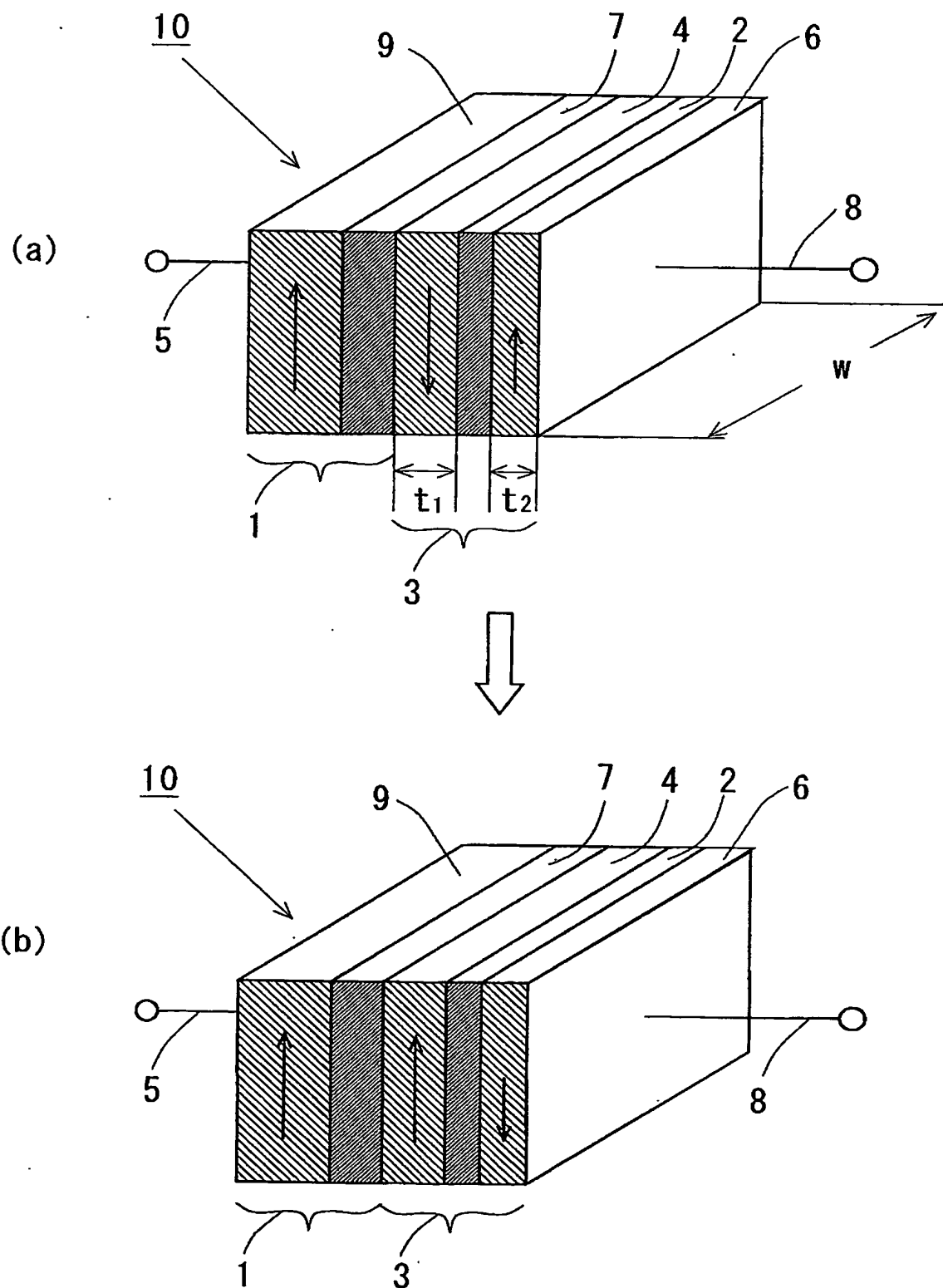
#### 【符号の説明】

##### 【0073】

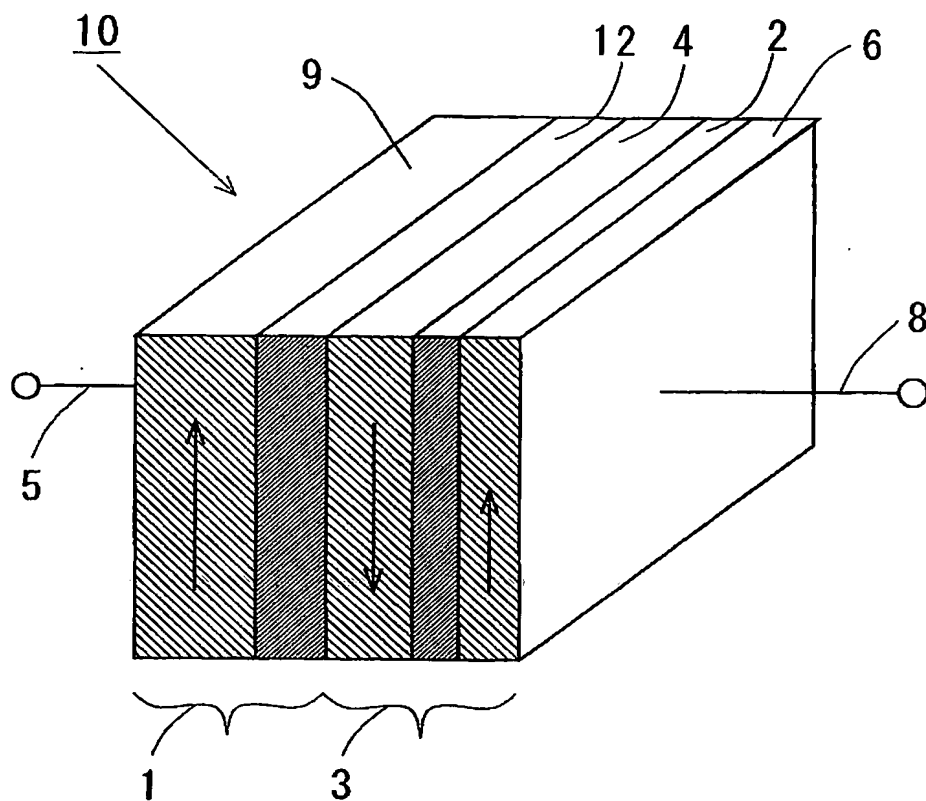
- 1: スピン注入部
- 2: 非磁性層
- 3: SyAF
- 4: 第1の磁性層
- 6: 第2の磁性層
- 7: 注入接合部
- 9: スピン偏極部
- 10, 14, 16: スピン注入デバイス
- 12: 非磁性絶縁層
- 17, 37: 多数スピン電子
- 18, 18', 38: トルク
- 19: CoまたはCo合金とRuの界面において反射された多数スピン電子
- 21: 反強磁性層
- 23: 強磁性層
- 25: 非磁性金属層
- 27: 強磁性自由層

- 28: 強磁性自由層上に設ける非磁性層
- 29: 非磁性層上に設ける強磁性層
- 30: スピン注入磁気装置
- 31: 固定層
- 32: 強磁性層
- 33: 絶縁層
- 36: MTJ素子
- 39: 少数スピン電子
- 41, 45: 磁性薄膜
- 42: 基板
- 43:  $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}\text{Al}$  薄膜
- 44: バッファ層

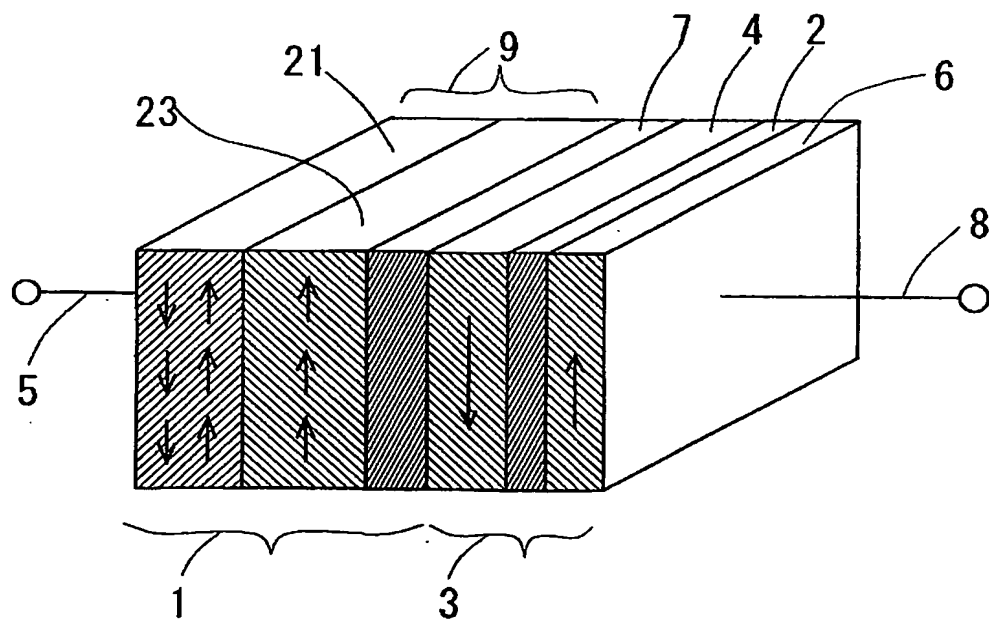
【書類名】 図面  
【図 1】



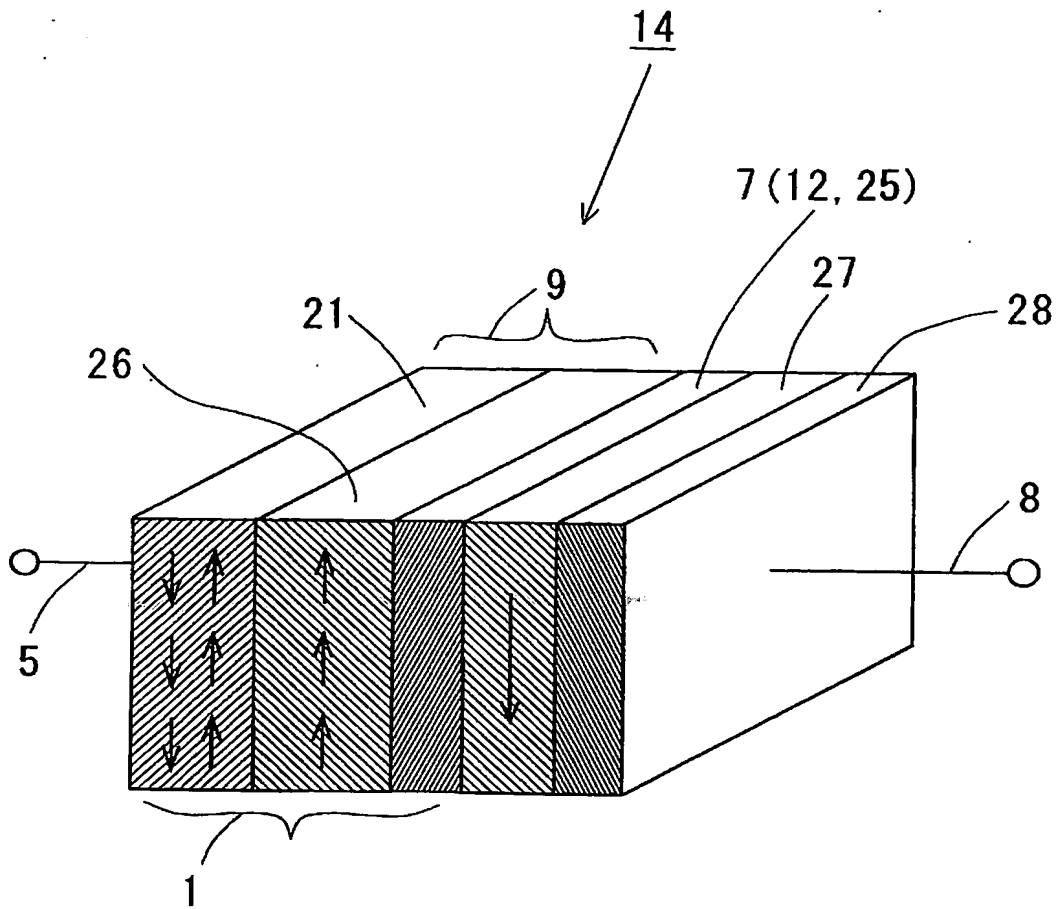
【図 2】



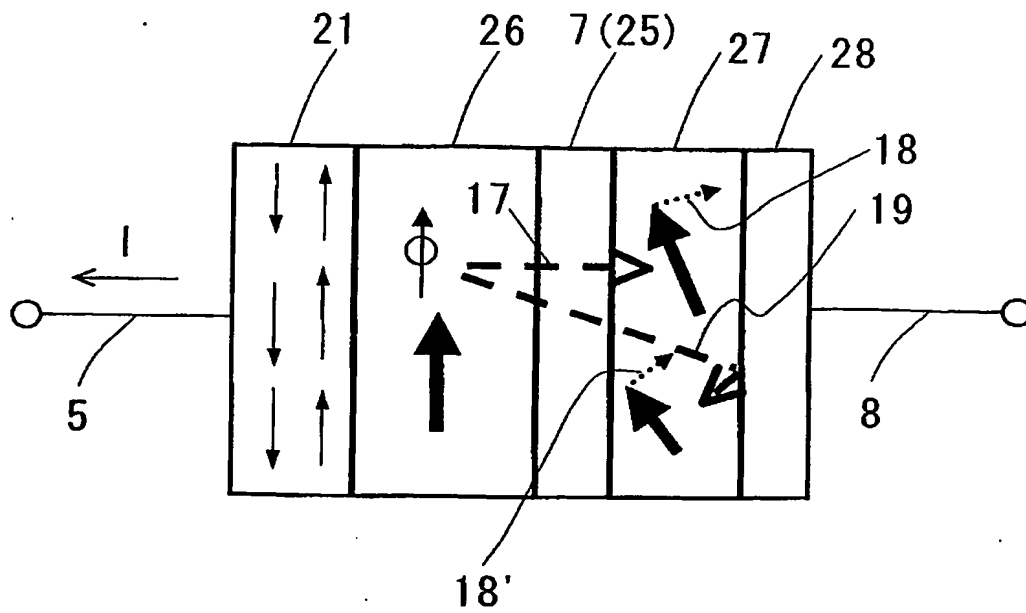
【図 3】



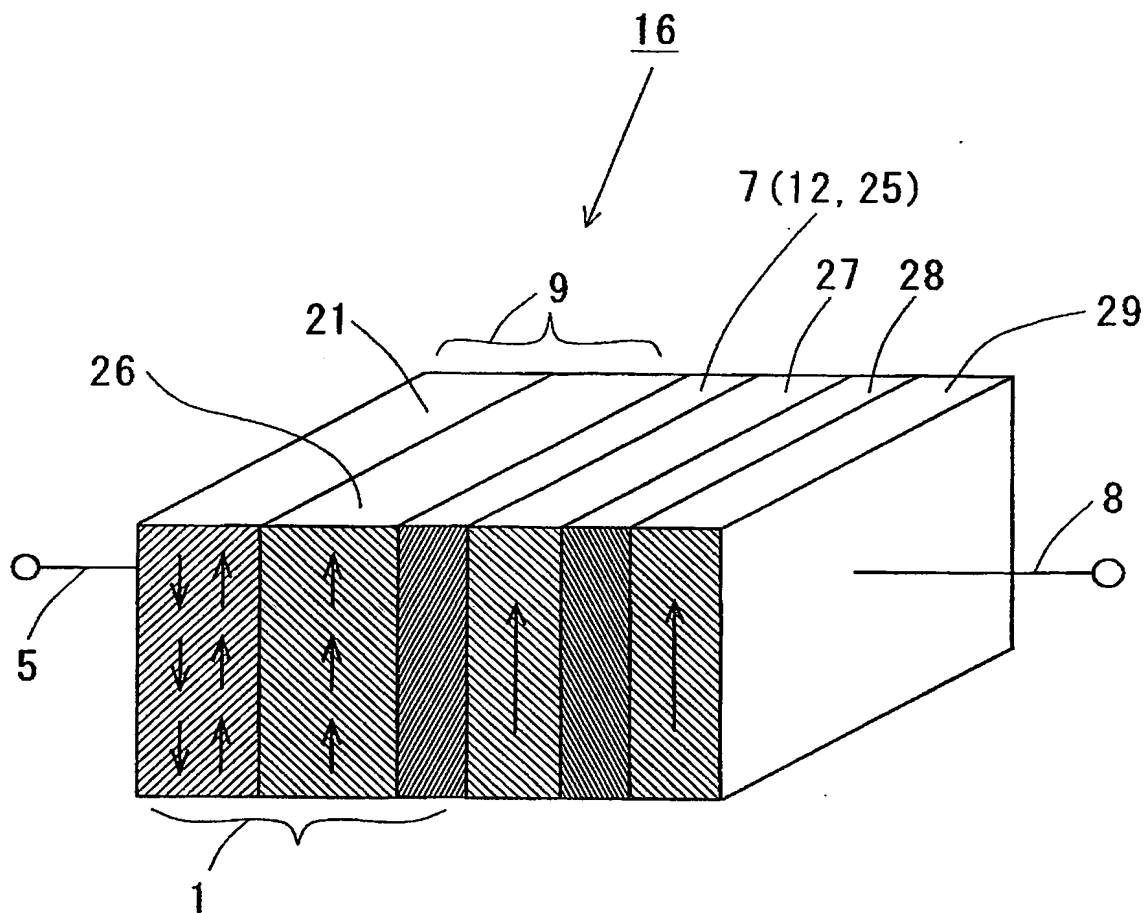
【図 4】



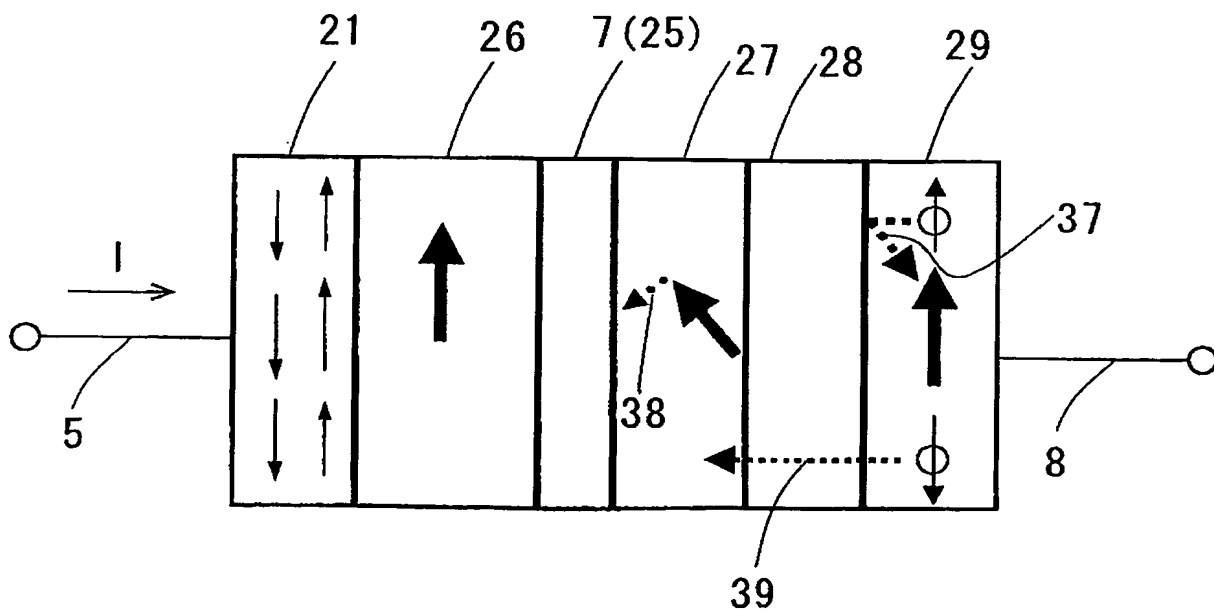
【図 5】



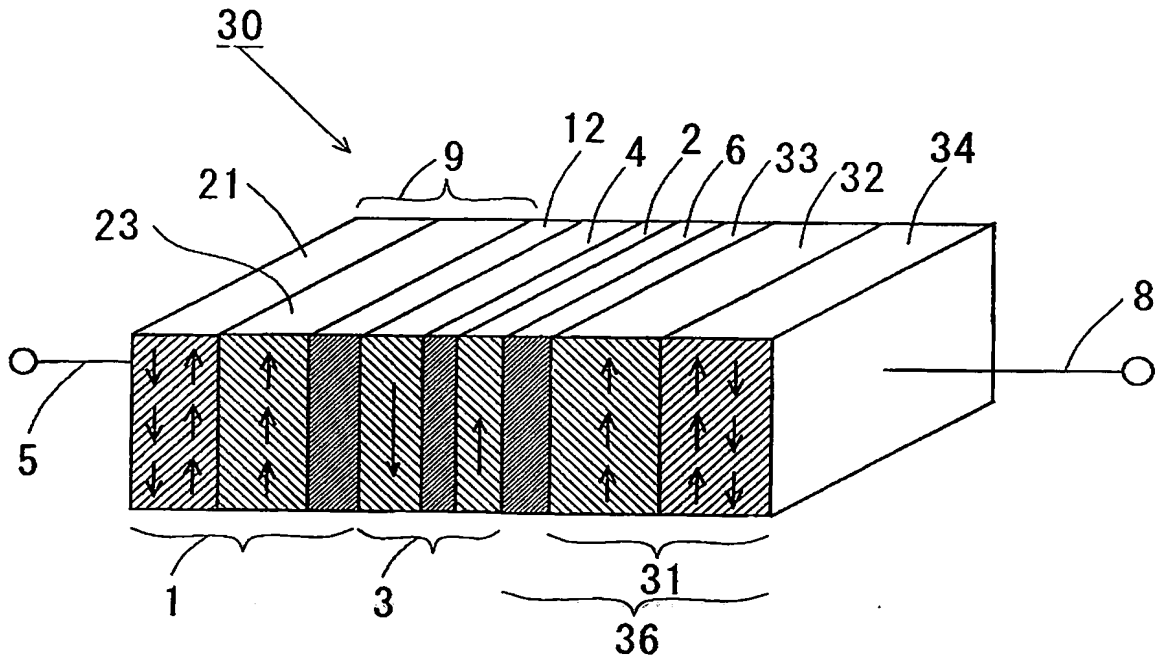
【図 6】



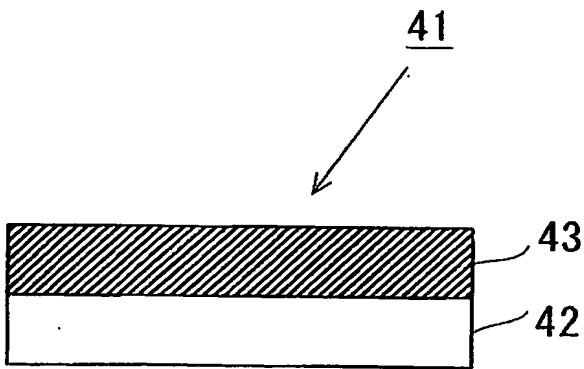
【図 7】



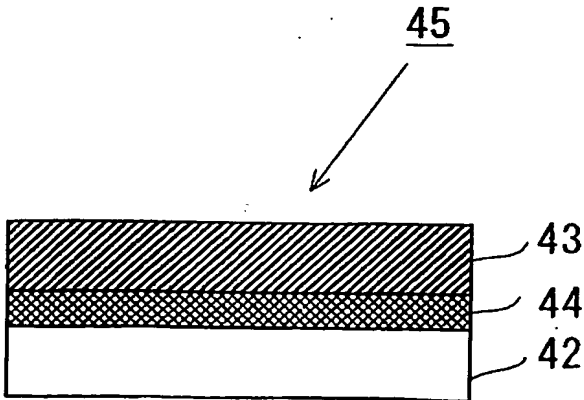
【図 8】



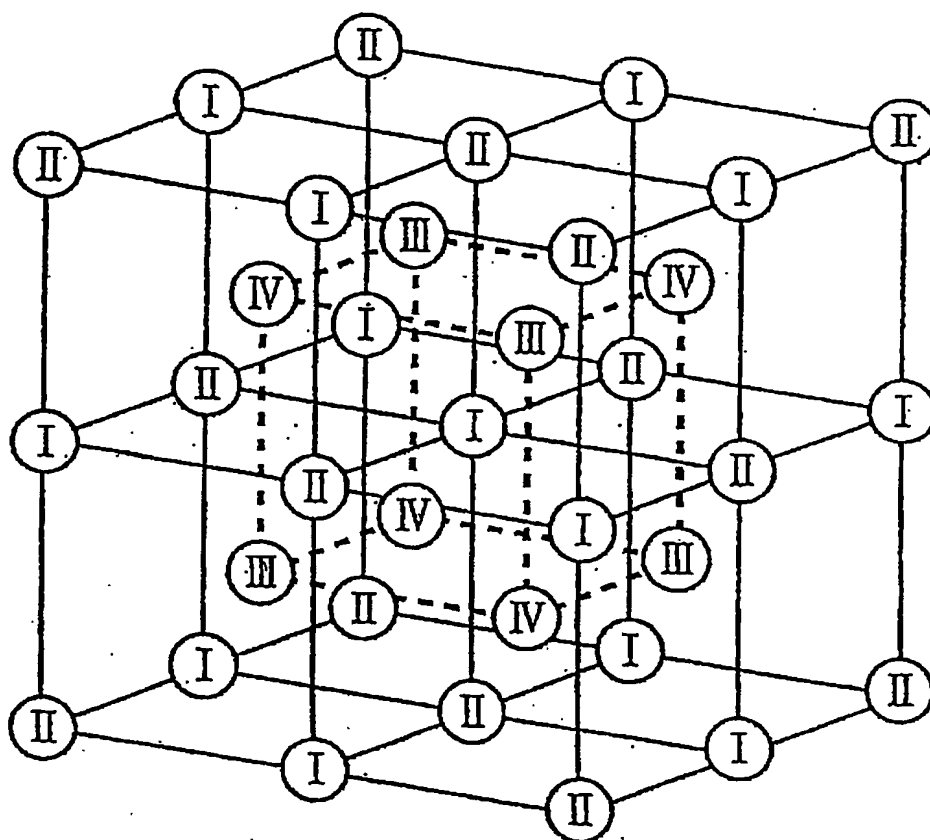
【図 9】



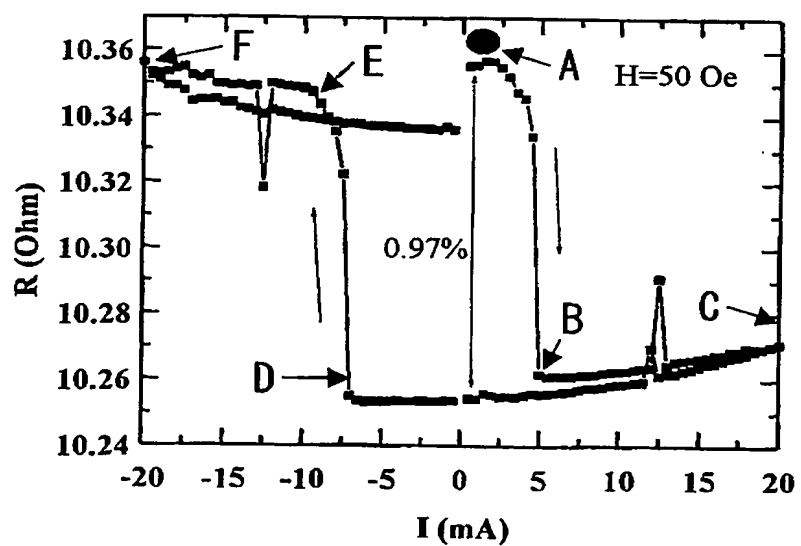
【図 10】



【図11】

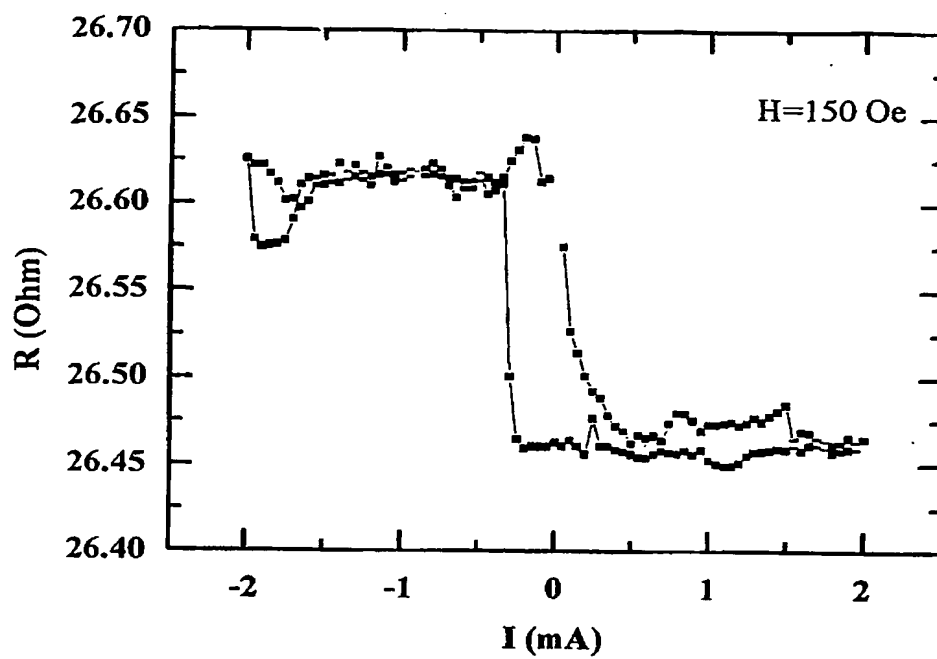


【図12】

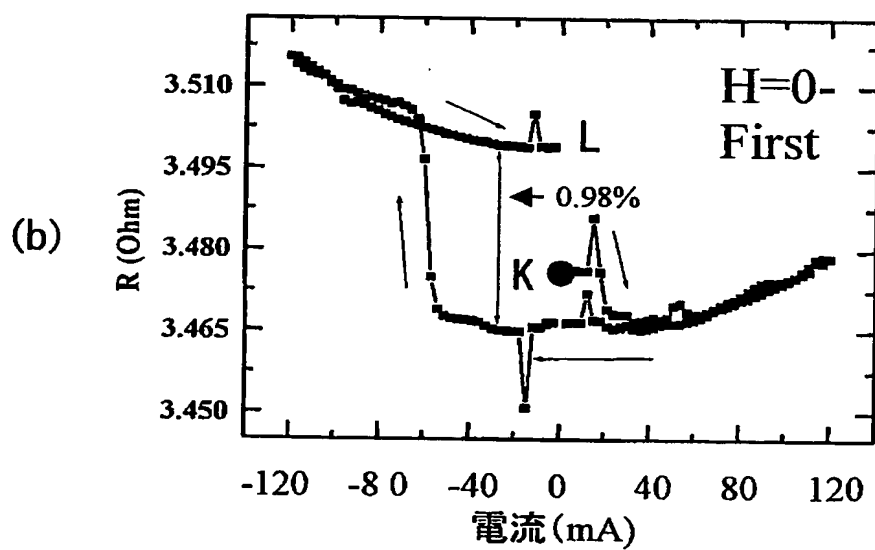
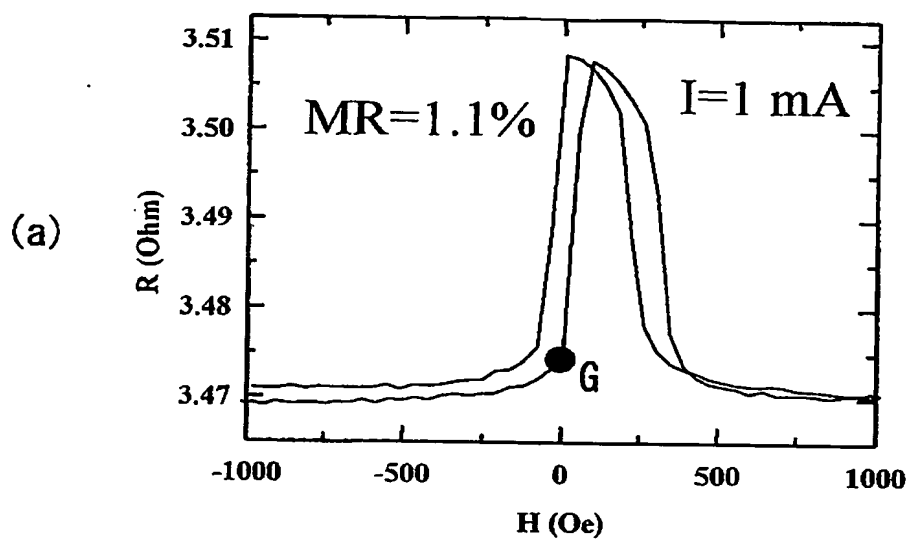




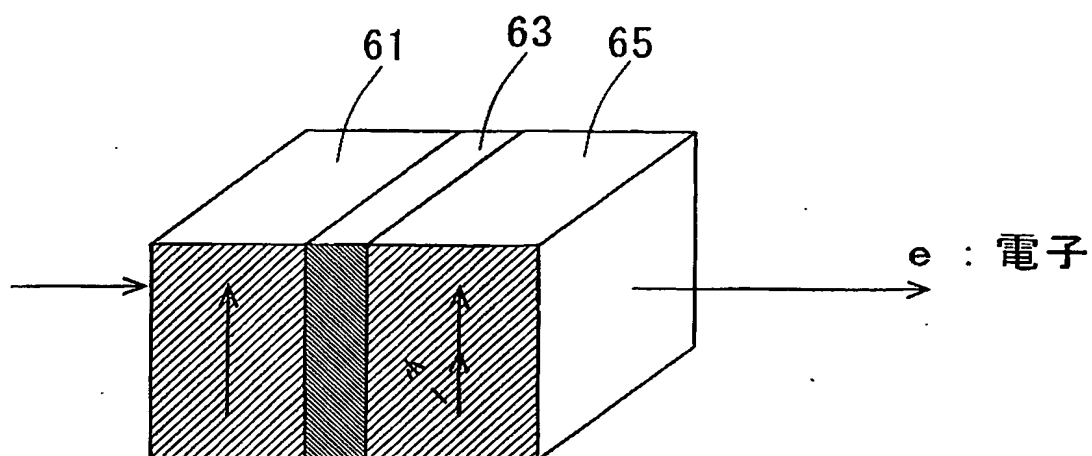
【図 13】



【図 14】



【図15】



## 【書類名】 要約書

## 【要約】

【課題】 小さな電流密度でスピン注入磁化反転することができる、スピン注入デバイス及びスピン注入磁気装置並びにスピン注入磁気メモリ装置を提供する。

【解決手段】 強磁性固定層 26 を含むスピン偏極部 9 と非磁性層の注入接合部 7 とからなるスピン注入部 1 と、スピン注入部 1 に接して設けられる強磁性フリー層 27 と、を含むスピン注入デバイス 14 において、非磁性層 7 が絶縁体 12 または導電体 25 からなり、強磁性フリー層 27 の表面に非磁性層 28 が設けられ、スピン注入デバイス 14 の膜面垂直方向に電流を流し、強磁性フリー層 27 の磁化を反転させる。超ギガビット大容量・高速・不揮発のMRAMをはじめ種々の磁気装置や磁気メモリ装置に利用できる。

【選択図】 図 4

出願人履歴情報

識別番号

[503360115]

1. 変更年月日

2003年10月 1日

[変更理由]

新規登録

住 所

埼玉県川口市本町4丁目1番8号

氏 名

独立行政法人 科学技術振興機構